第 37 卷第 8 期
2017 年 4 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.37,No.8
Apr.,2017

DOI: 10.5846/stxb201511112282
王彬, 于澎涛, 王顺利, 王彦辉,张雷,刘贤德,金铭,张学龙.祁连山北坡青海云杉林下苔藓层对土壤水分空间差异的影响.生态学报,2017,37(8):2753-2762.
Wang B, Yu P T, Wang S L, Wang Y H, Zhang L, Liu X D, Jin M, Zhang X L.Effects of moss layers on the spatial variation in soil moisture in a *Picea crassifolia* forest on the north-facing slope of the Qilian Mountains.Acta Ecologica Sinica,2017,37(8):2753-2762.

祁连山北坡青海云杉林下苔藓层对土壤水分空间差异的影响

王 彬[1], 于澎涛[1,*], 王顺利[2], 王彦辉[1],张 雷[1],刘贤德[2],金 铭[2],张学龙[2]
1 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所,国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091
2 甘肃省祁连山水源涵养林研究院, 张掖 734000

摘要:苔藓层是青海云杉林(*Picea crassifolia* forest)下的一个重要层片,它通过截持降水和减少土壤蒸发,对土壤水分产生影响。以祁连山北坡排露沟小流域的一个阴坡(海拔 2700 m,植被为青海云杉林)作为样坡,于 2010—2012 年生长季对青海云杉林下有、无苔藓层覆盖地点的土壤水分进行对比观测。结果表明在祁连山青海云杉林下,苔藓层覆盖能减少土壤水分的空间差异。主要表现为:(1)无苔藓覆盖各观测点土壤含水量极差达 62.2 mm,空间变异系数(CV)为 17.3%;有苔藓层覆盖观测点土壤含水量空间变异系数为 2.3%,仅为无苔藓覆盖地点的 1/7.5,空间差异极显著(sig. <0.001)。(2)在持续无雨、小雨后和连阴雨天气下,有苔藓覆盖地点土壤含水量空间差异均显著小于无苔藓覆盖地点(sig. <0.05)。在持续无雨的情况下,无苔藓层覆盖各观测点土壤含水量空间变异系数平均值为 19.8%,有苔藓覆盖地点土壤含水量空间变异系数平均值为 6.6%,仅为无苔藓覆盖地点的 1/3。小雨后,无苔藓覆盖各观测点土壤含水量空间变异系数平均值为 15.2%,有苔藓覆盖地点土壤水分空间变异系数平均为 5.1%,为无苔藓覆盖地点的 1/3。连阴雨后,无苔藓覆盖各观测点土壤含水量空间变异系数平均为 15.4%,有苔藓覆盖地点土壤水分空间变异系数平均为 4.6%,为无苔藓覆盖地点的 1/3.3。(3)持续无雨的情况下,苔藓层减小土壤水分空间差异的作用主要反映在土壤表层 0—15 cm,对深层的作用不显著。而小雨和连阴雨后,苔藓层对 15—80 cm 深层土壤影响显著,而表层 0—15 cm 没有明显规律。

关键词:祁连山;苔藓层;土壤水分;青海云杉林;空间差异

Effects of moss layers on the spatial variation in soil moisture in a *Picea crassifolia* forest on the north-facing slope of the Qilian Mountains

WANG Bin[1], YU Pengtao[1,*], WANG Shunli[2], WANG Yanhui[1], ZHANG Lei[1], LIU Xiande[2], JIN Ming[2], ZHANG Xuelong[2]
1 *Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing* 100091, *China*
2 *Academy of Water Resources Conservation Forests in Qilian Mountain of Gansu Province, Zhangye* 734000, *China*

Abstract: Moss layers comprise an important synusia under the *Picea crassifolia* forest, as they can change the soil moisture content by intercepting precipitation and reducing soil water evaporation. In this study, a shady slope at an elevation of 2700 m in the Pailugou Small Watershed of the Qilian Mountains was chosen as the study region to analyze the influence of moss layers on soil moisture content through observations performed from years 2010 to 2012 in the *Picea crassifolia* forest. The results showed that moss layers can dramatically reduce the spatial variability of soil moisture content during the growing

基金项目:国家自然科学基金项目(91225302,91425301,31360201)
收稿日期:2015-11-11; **网络出版日期**:2016-10-29
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yupt@ caf.ac.cn

season of the *Picea crassifolia* forest. The spatial variability of the soil moisture content was 62.2 mm in the sites without moss layers, and the coefficient of variation (CV) in spatial change was 17.3%. The CV in the sites with moss layers was 2.3%. The sites with moss layers only account for 1/7.5 of the without moss layer covered. So the spatial variability of soil moisture content showed significant differences between sites. The CV of the sites with moss layers was significantly lower than that of sites without moss layers (sig.< 0.05). The presence of moss layers could reduce the spatial variability no matter the level of rainfall. For example, the CV of soil moisture content was 19.8% in the rainless sites without moss layers, while the sites with moss layers showed only 1/3 of this variation under rainless conditions. The CV of soil moisture content was 15.2% in the sites with light rain and without moss layers, while the sites with moss layers only showed 1/3 of this variation under light rain conditions. The CV of soil moisture content was 15.4% in the sites experiencing continuous rain that did not have moss layers, while the sites with moss layers only accounted for 1/3.3 of the sites with continuous rain. Under rainless conditions, spatial differences in sites with moss layers were significantly smaller than those in sites without moss layers in soil layers at a depth of 0—15 cm. Under conditions of light or continuous rain, spatial differences between sites with moss layers had no correlation with the sites without moss layers in the 0—15 cm soil layers, as the function of moss layers in reducing spatial differences in soil water content was mainly reflected in the 15—80 cm soil layers.

Key Words: Qilian Mountains; moss layer; soil moisture; *Picea crassifolia*; spatial variation

青海云杉林(*Picea crassifolia*)是祁连山的主要森林类型之一[1],其生态水文功能对黑河乃至西北的水资源时空分布具有重要作用[1-3]。然而,通常的森林水文研究多关注乔木层的水文影响,如林冠的截留、蒸发等[3-13]。而对于普遍存在于青海云杉林下的苔藓层却较少关注。

研究表明苔藓层具有类似“海绵”的吸水作用,如在充分浸泡后,苔藓能够吸收达其自身干重的几倍甚至十几倍的水分[14]。青海云杉林下的苔藓层,就一次降水过程而言,林内降水小于 3.7 mm 时可截留全部的降水[15]。苔藓层作为直接覆盖在地表上的层片,还可以有效抑制土壤水分蒸发,如在太行山主要植被苔藓层水文作用的研究表明,在 1995 年 8 月份,裸地表的日蒸发量为 1.82 mm,而有苔藓覆盖的日蒸发量仅为 0.45 mm,1 个月期间,覆盖有苔藓的地表蒸发量为 13.8 mm,裸地为 56.3 mm,有苔藓覆盖地点蒸发量仅为裸地表的 1/5 左右,据估算苔藓的存在每年可减少地表蒸发量的 75.49%[16]。刘兴明等对祁连山青海云杉林苔藓层的研究也证明有苔藓林地土壤水分蒸发较无苔藓林地少且稳定[17]。

正因为苔藓层截持降水,从而减少了土壤水分的入渗,亦即减少了土壤水分的输入;与此同时,苔藓层的覆盖减少了蒸发,亦即减少了水分从地表的直接输出,而在这两个过程综合作用下必然改变坡面土壤含水量。但苔藓层是否会改变土壤含水量的空间分布尚不清楚,这大大限制了对坡面植被和土壤水分相互关系的认识。因此,本研究选取位于祁连山北坡的一个阴坡,在同一片青海云杉林下,连续观测有苔藓层覆盖和无苔藓层覆盖地点的土壤含水量,比较苔藓层覆盖对青海云杉林下土壤水分空间变化的影响。以期确定苔藓层对青海云杉林下的水文过程和祁连山区生态水文的影响,为进一步系统研究该地区区域水文过程的影响提供依据,并为西北干旱区水-土-植被综合管理提供一定的科学支持。

1 研究区概况

研究区位于甘肃祁连山中段北坡排露沟小流域(38°32′—38°33′N,100°17′—100°18′E),海拔 2600—3800 m,流域面积为 2.91 km^2,属于高寒半干旱半湿润山地森林草原气候。小流域年降水量 435.5 mm,年均蒸发量 1051.7 mm;雨季(5 月—10 月)降水占全年的 87.2%左右,旱季(11 月—次年 4 月)降水仅占全年的 12.8%左右,其中降雪占 2.8%;流域降水不仅随时间变化,而在空间上因海拔、坡向也有较大的差异,如阴坡降水比阳坡多 7%左右[18]。

流域阳坡为山地草原,阴坡为森林景观,以藓类青海云杉林为主。藓类青海云杉林,呈斑块状分布在 2700 m 到 3300 m 范围内的阴坡、半阴坡,在海拔 3000—3300 m 有灌木云杉林分布,海拔 3300 以上分布着亚高山湿性灌木林,森林覆盖率为 65%。

林下苔藓层十分发育,其高度为 0—14 cm,覆盖度从 50%左右到 85%。林下苔藓层分部不均,主要呈斑块状分布。苔藓层的种类主要为山羽藓(*Abietinella abietina*)。

研究区土壤主要为山地森林灰褐土,山地栗钙土及亚高山灌丛草甸土等。

2　研究方法

2.1　样坡的选取与土壤水分观测点的布设

选取排露沟小流域海拔 2700—2800 m 东北向阴坡做为研究样坡,样坡长 230 m 左右。优势种和建群种为青海云杉,郁闭度平均为 0.65,密度为 0.2 株/m^2,林下灌木层和草本层均不发育,林下苔藓层生长茂盛,且呈斑块状分布。

样坡坡下有 20 m×20 m 的固定样地,为甘肃祁连山水源涵养林研究院的长期固定样地。以原有固定样地为基础,又根据有、无苔藓层覆盖,再分设有苔藓层覆盖和无苔藓层覆盖的对照测点,在样坡上共布设了 6 个土壤水分监测点,依次编号为 Y1(有苔藓层覆盖观测点 1)、Y2(有苔藓层覆盖观测点 2)、Y3(有苔藓层覆盖观测点 3)、W1(无苔藓层覆盖观测点 1)、W2(无苔藓层覆盖观测点 2)、W3(无苔藓层覆盖观测点 3)。观测点均位于样坡的坡中下部,坡向、坡度基本一致,土壤类型主要为山地森林灰褐土,土质主要为轻壤土和中壤土,土层厚度为 1.2—1.6 m,土壤质地较为粗糙,透水性强。观测点信息见表 1。

表 1　土壤水分观测点基本信息

Table 1　Basic information of soil moisture observation point

	W1	W2	W3	Y1	Y2	Y3
有无苔藓层覆盖 Moss layer	无	无	无	有	有	有
海拔高度 Altitude/m	2755	2740	2725	2771	2752	2730
坡度 Slope/(°)	22	25	23	27	26	30
地表枯落物厚度 Thickness of litter/cm	1—5	<3	<3	/	/	/
地表枯落物层盖度 Litter coverage/%	<50	<50	<50	/	/	/
苔藓层厚度 Thickness of moss/cm	/	/	/	3—10	1—8	<3
苔藓层盖度 Moss coverage/%	/	/	/	85	75	50
平均胸径 Mean DBH/cm	22.2	12.7	12.2	13.6	11.6	10.3
平均树高 Mean height/m	12.3	10.6	8.7	8.9	6.7	7.5

W:无苔藓层覆盖 without moss layer cover;Y:有苔藓层覆盖 with moss layer cover ;W、Y 后的数字表示不同观测点

2.2　土壤水分监测

土壤水分测定采用土钻法。于 2010—2012 年生长季(5 月至 9 月)对上述观测点的土壤水分含量取样、测定,其中,2011 年 5—10 月为每月 1 日、11 日和 21 日定期测定,2010 年和 2012 年则在每月的中旬测定。取土时,按 0—10 、10—20 、20—30 、30—40 、40—50 、50—60 、60—80 cm 分层取样,每个土层每次取 3 个平行土样。带回室内测定湿重(G_1)后,再在 105℃ 下烘干,称其干重(G_2),按下式(式 1)计算得到每个土壤样品的质量含水量。

$$H = (G_1 - G_2)/G_2 \times 100\% \quad (1)$$

式中,H 为土壤质量含水量(%)。

再对 3 个平行样的土壤质量含水量取平均值,得到该土层的此次平均质量含水量。

2.3　土壤水分数据处理

0—80 cm 土层土壤含水量为 $\bar{\theta}$,有(无)苔藓层覆盖观测点 Y1、Y2、Y3(W1、W2、W3)中土壤含水量最大

为 θ_{max}，最小为 $\bar{\theta}_{min}$，则有(无)苔藓覆盖 3 个观测点间土壤水分极差为 $\bar{\theta}_{max}-\theta_{min}$。$i$ 为测量次数，j 为不同土壤层次(0—10 cm 土层 j 为 1，10—20 cm 土层 j 为 2，…，70—80 cm 土层 j 为 8)。

第 j 层的土壤含水量不同测量时间的平均值为：

$$\overline{\theta_j} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\overline{\theta_{ij}} \quad (2)$$

0—80 cm 土层土壤总含水量：

$$\bar{\theta} = \sum_{j=1}^{8}\overline{\theta_j} \quad (3)$$

对有、无苔藓覆盖观测点土壤含水量的空间差异使用空间变异系数(CV)，直观的反映有苔藓覆盖各观测点、无苔藓覆盖各观测点土壤水分的空间差异。使用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验有、无苔藓覆盖地点两组土壤水分空间变异系数(CV)差异的显著性。显著性水平为 $\alpha=0.05$。

3 结果与分析

3.1 研究期间降水特征

位于排露沟小流域 2600 m 处的气象站 1994—2003 年测得的年降水量为 290—468 mm，平均为 368 mm[9]。如表 2 所示，2010—2012 年研究区年降水总量分别为 356、325 mm 和 335 mm，与多年平均降水量相近；降水主要集中在生长季(5 月 1 日至 9 月 30 日)，降雨量分别为 269、271 mm 以及 281 mm 占年降雨总量的 76%、83%、84%。

在所有降雨场次中以小雨居多，中大雨少，如 2010 年小雨 41 场，中雨 7 场，大雨 1 场；2011 年小雨 50 场，中雨 4 场，大雨 1 场；2012 年小雨 49 场，中雨 9 场，大雨 0 场；然而，少数几场中到大雨降下的水量却占到 32%—51%。总体上，小雨降雨总量与中到大雨的雨量相当。

生长季连阴雨(指连续 3—5d 以上的阴雨天气现象)较多，2010 年生长季共有 9 场连阴雨，连阴雨天数共 44 d；2011 年生长季共有 6 场连阴雨，连阴雨天数共 33 d；2012 年生长季连阴雨共有 10 场，连阴雨天数为 39 d。2011 年 5 月 9 日—5 月 11 日为连阴雨天气，期间出现一场中雨(16.1 mm)，降雨总量为 22.3 mm；6 月 20 日—7 月 5 日处于连阴雨天气，每场降雨均小于 10 mm，降雨总量为 48.4 mm。8 月 10 日—8 月 18 日为连阴雨天气，期间出现两场中雨(14.3 mm、17.9 mm)和一场大雨(27.4 mm)，降雨总量为 78.7 mm。

表 2 2010—2012 年生长季降水强度特征

Table 2 Characteristics of the rainfall events during the growing seasons of 2010—2012

年份 Year	统计值 Statistic	小雨 Small rain		中雨 Moderate rain		大雨 Heavy rain	合计 Total
		<5.0 mm	5.0—10.0 mm	10.0—17.0 mm	17.0—25.0 mm	>25.0 mm	
2010	降雨场数	30	11	5	2	1	49
	累积降雨量/mm	65.1	71.1	64.7	39.1	29.1	269.1
2011	降雨场数	34	16	3	1	1	55
	累积降雨量/mm	72.4	110.8	42.8	17.7	27.4	271.3
2012	降雨场数	41	8	5	4	0	58
	累积降雨量/mm	77.1	60.5	63.9	79.2	0	280.7

3.2 苔藓层覆盖对生长季平均土壤含水量空间差异的影响

图 1 是有、无苔藓覆盖地点生长季平均土壤含水量空间差异图。无苔藓覆盖的各观测点，土壤含水量最高与最低的观测点之差大于有苔藓覆盖地点。2010—2012 年间有苔藓层覆盖地点土壤含水量极差为 3.6—13.1 mm，平均为 7.3 mm，空间变异系数(CV)为 1.1%—4.2%；而无苔藓覆盖地点土壤含水量极差为 55.6—66.5 mm，平均为 62.2 mm，CV 为 16.0%—18.7%。无苔藓覆盖地点土壤含水量空间变异系数平均为 17.3%；显著大于有苔藓覆盖地点，平均值为 2.3%。有、无苔藓覆盖地点的土壤含水量变异系数存在极显著差异(sig. <0.001)。

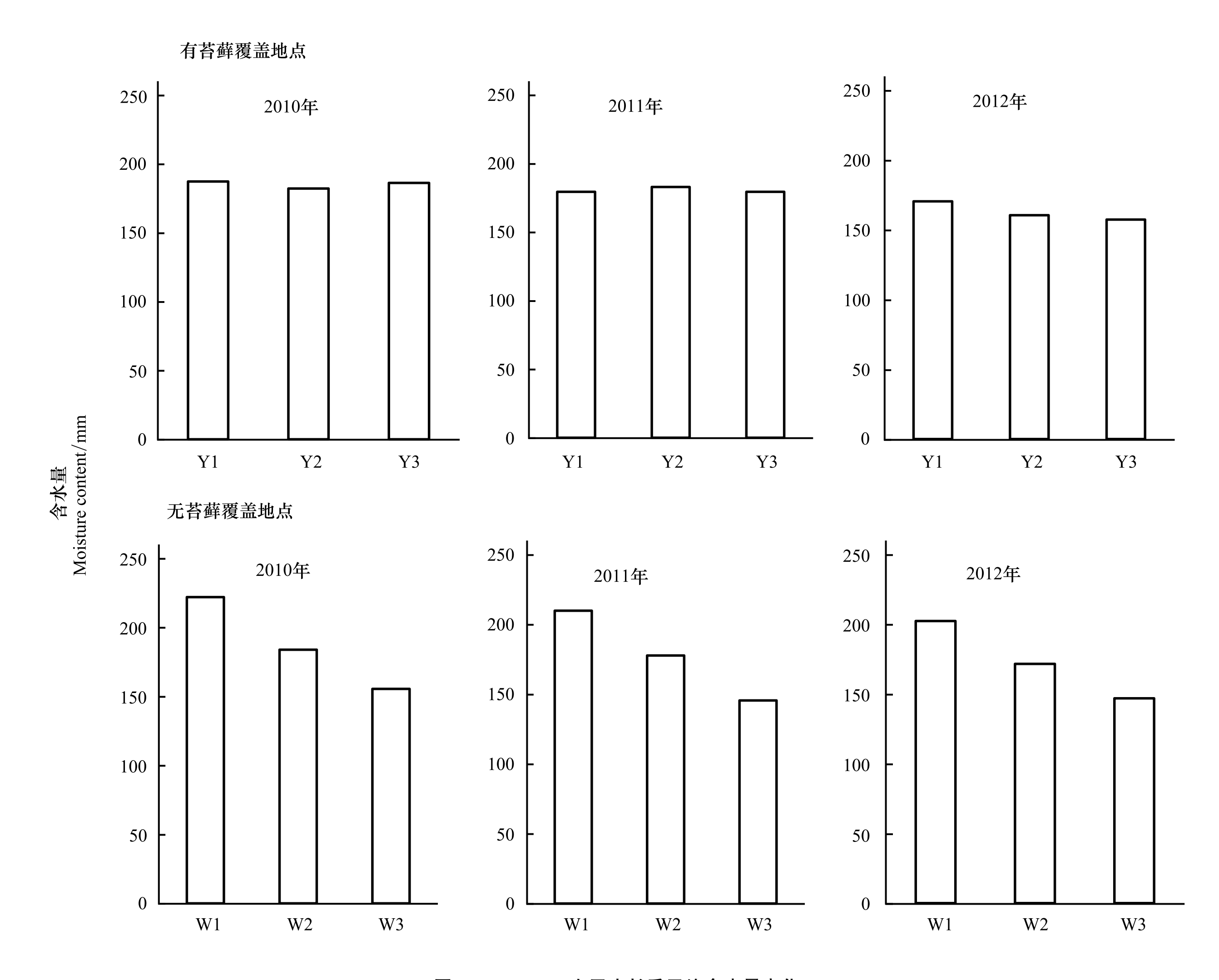


图 1　0—80 cm 土层生长季平均含水量变化

Fig.1　The growing season average soil moisture spatial variability on different sites with or without moss layer in *Picea crassifolia* forest

W:无苔藓层覆盖 without moss layer cover;Y:有苔藓层覆盖 with moss layer cover ;W、Y 后的数字表示不同观测点

3.3　不同天气条件下苔藓层的作用

3.3.1　持续无雨时苔藓层对不同测点土壤含水量空间差异的影响

在持续无雨的天气下,有苔藓层覆盖地点 0—80 cm 土壤总含水量的空间差异明显小于无苔藓覆盖地点(表 3),如在 2010/8/6、2011/7/14、2012/7/16 的 3 个测量时间,有苔藓覆盖观测点土壤含水量极差为 4.6—24.7 mm,不同测点变异系数为 2.4%—9.2%,平均值为 6.6%;而无苔藓层覆盖地点极差为 51.4 —63.7 mm,变异系数分别为 17.7%—23.6%,平均值为 19.8%。在该天气条件下,有、无苔藓覆盖地点的土壤含水量变异系数存在极显著差异(sig.=0.009)。

表 3　无降雨条件下青海云杉林有无苔藓覆盖土壤含水量的空间差异

Table 3　Spatial variability of soil moisture content in the condition of rainless

测定时间 Data	距前次降雨时间/d The time of rainless	前次降雨类型 Rainfall patterns in the previous	前次降雨量 The previous rainfall/mm	有苔藓覆盖/mm With moss layer cover			变化范围 Range (max—min)/mm	CV%	无苔藓覆盖/mm Without moss layer cover			变化范围 Range (max—min)/mm	CV%
				Y1	Y2	Y3			W1	W2	W3		
2010-08-06	19	连阴雨	29.4	159.1	149.1	135.3	23.8	8.1	175.3	138.1	123.9	51.4	18.2
2011-07-14	10	连阴雨	28.7	157.9	155.6	133.2	24.7	9.2	172.2	146.1	120.4	51.8	17.7
2012-07-16	11	连阴雨	23.5	162.5	165.8	157.9	4.6	2.4	191.0	132.0	127.3	63.7	23.6

有苔藓层覆盖测点 Y1、Y2、Y3 含水量极差在 0—15 cm 随土壤深度的增加逐渐减小(图 2),在 15 cm 处达到相对较小值;15—80 cm 深度范围内,3 个观测点土壤含水量的极差有所增大。如在 2010/8/6 表层 0—5 cm 土壤含水量的极差为 1.9 mm,0—15 cm 深度内,土壤含水量极差的最小值为 1.3 mm,15—80 cm 深度范围内土壤含水量极差的变化范围为 1.5—7.6 mm。

在整个土壤剖面上无苔藓覆盖测点 W1、W2、W3 含水量的极差总体上均大于有苔藓覆盖测点。无苔藓层覆盖测点 W1、W2、W3 土壤含水量极差由 0—25 cm 随土壤深度的增加逐渐减小,在 25 cm 左右的土层深度达到相对较小值;如 2010/8/6 表层 0—5 cm 处 3 个测点土壤含水量的极差为 5.5 mm,在 0—25 cm 范围内土壤含水量极差的最小值为 2.9 mm,25—80 cm 深度范围内,土壤含水量的极差随土层深度的增加呈逐渐增大的趋势,极差变化范围为 5.2—13.0 mm。

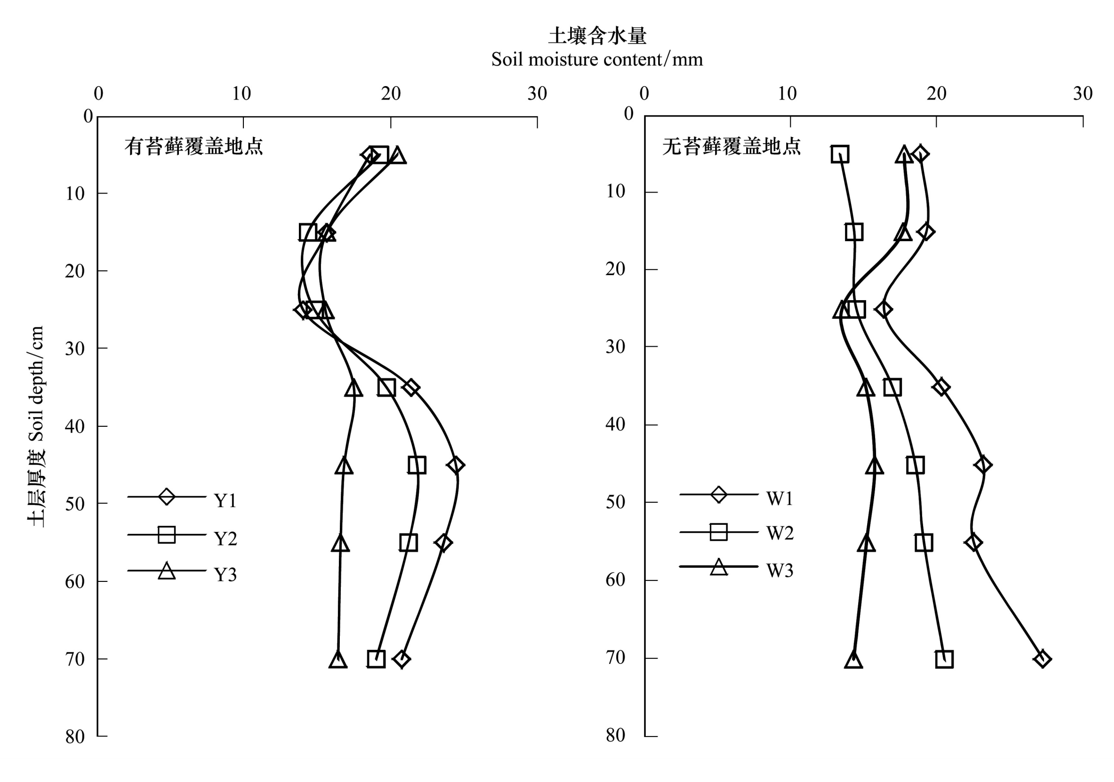


图 2 2010-08-06 无降雨条件下有/无苔藓覆盖观测点土壤水分剖面变化特征

Fig.2 Soil moisture variation along soil profile at sites with or without moss layer in *Picea crassifolia* forest on Aug 6th, 2010

3.3.2 小雨后苔藓层覆盖对土壤含水量空间差异的影响

小雨后,有苔藓覆盖地点土壤含水量的空间差异仍显著小于无苔藓覆盖地点(表 4)。2010-06-30、2011-07-24、2012-08-05 的 3 个测量时间有苔藓覆盖观测点整个剖面的土壤含水总量极差为 7.3—23.7 mm,变异系数为 2.6%—6.4%,平均值为 5.1%;无苔藓覆盖观测点土壤含水量极差为 35.1—66.4 mm,变异系数为10.3%—20.3%,平均值为 15.2%。该天气条件下,有、无苔藓覆盖地点的土壤含水量变异系数存在较大差异(sig. = 0.033)。

图 3 是小雨后有、无苔藓覆盖观测点土壤水分沿剖面变化,在 0—80 cm 土壤剖面内,有苔藓层覆盖观测点(Y1、Y2、Y3)和无苔藓层覆盖观测点(W1、W2、W3)土壤含水量沿剖面仍具有相似的变化趋势,即含水量由表层至 25 cm 呈逐渐减小的趋势,在 25 cm 处出现较小值;在 25—80 cm 深度内土壤含水量随土壤深度的变化有不同程度的增加。

如有苔藓覆盖地点 2011-08-05 的 3 个观测点的土壤含水量极差由 0—25 cm 随土壤深度的增加逐渐减小,在 25 cm 处达到相对较小值;25—80 cm 深度范围内,各观测点土壤含水量的空间差异基本维持较低的水平。表层 0—5 cm 处,土壤含水量的极差为 8.6 mm;在 0—25 cm 深度内,土壤含水量极差的最小值 1.3 mm;

25—80 cm 深度内土壤含水量极差的变化范围为 1.4—3.9 mm。无苔藓覆盖 W1、W2、W3 测点 0—25 cm 土壤含水量空间差异随土层深度的增加而逐渐减小;25—80 cm 深度范围内,不同测点土壤含水量极差随土层深度的增加呈增大的趋势。如 2011-08-05 无苔藓覆盖测点 W1、W2、W3 表层 0—5 cm 土壤含水量极差分别为 9.3 mm;在 0—25 cm 深度土壤含水量极差的最小值为 1.8 mm;25—80 cm 深度内土壤含水量的极差变化范围为 3.0—10.7 mm。

表 4　小雨后不同测点土壤含水量空间变化

Table 4　Soil moisture spatial variability at different sites after light rain

测定时间 Date	降雨量 Precipitation/mm	有苔藓覆盖/mm With moss layer cover			变化范围 Range (max—min)/mm	CV%	无苔藓覆盖/mm Without moss layer cover			变化范围 Range (max—min)/mm	CV%
		Y1	Y2	Y3			W1	W2	W3		
2010-06-30	8.7	201.7	182.6	206.3	23.7	6.4	203.7	201.9	168.6	35.1	10.3
2011-07-24	9.2	149.9	141.9	132.0	17.1	6.3	197.5	155.9	131.1	66.4	20.3
2011-08-05	7.8	154.6	148.3	155.6	7.3	2.6	161.7	158.6	122.0	39.7	15.0

小雨后表层 0—25 cm 有苔藓覆盖观测点土壤含水量的空间差异略小于无苔藓覆盖地点;而 25—80 cm 有苔藓覆盖测点含水量空间差异显著小于无苔藓覆盖测点。

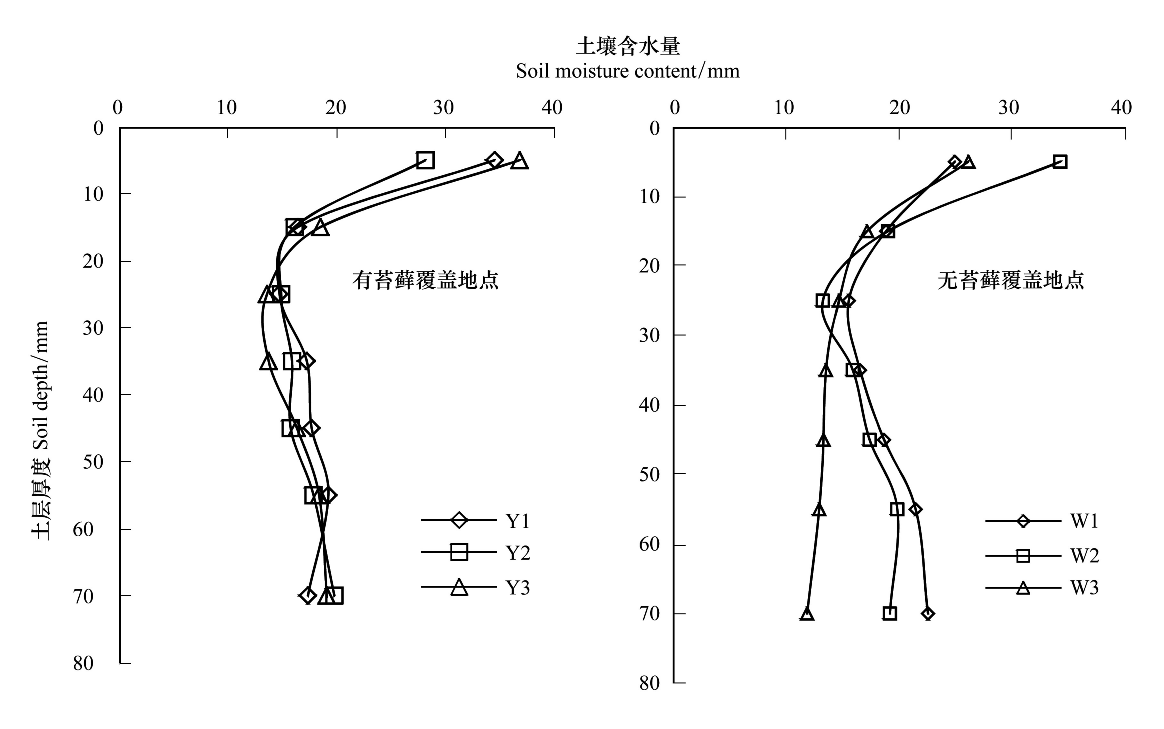


图 3　2011-08-05 小雨后有/无苔藓覆盖观测点土壤水分剖面变化特征

Fig.3　Soil moisture variation along soil profile at sites with/without moss layer in *Picea crassifolia* forest on Aug 5th, 2011

3.3.3　连阴雨后苔藓层覆盖对土壤含水量的空间差异的影响

连阴雨后,整个剖面土壤含水量均有明显增加(表 5)。2010-07-10、2011-07-05、2011-08-19 的 3 个测量时间有苔藓覆盖观测点土壤含水量空间差异为 15.1—27.5 mm,空间变异系数为 3.2%—5.8%;无苔藓覆盖观测点土壤含水量空间差异为 45.6—82.2 mm,空间变异系数为 12.1%—17.2%。有苔藓覆盖地点土壤含水量的空间差异仍显著小于无苔藓覆盖地点。该天气条件下,有、无苔藓覆盖地点的土壤含水量变异系数存在极显著差异(sig. =0.004)。

表 5 连阴雨后不同测点土壤含水量

Table 5 Soil moisture spatial variability at different sites after continuous rain

测定时间 Date	降雨量 Precipitation/mm	有苔藓覆盖/mm With moss layer cover			变化范围 Range (max—min)/mm	CV%	无苔藓覆盖/mm Without moss layer cover			变化范围 Range (max—min)/mm	CV%
		Y1	Y2	Y3			W1	W2	W3		
2010-07-10	29.6	257.0	241.9	253.6	15.1.	3.2	278.9	239.8	196.7	82.2	17.2
2011-07-05	27.8	203.1	185.2	197.6	17.9	4.7	217.9	186.4	172.3	45.6	12.1
2011-08-19	78.7	225.9	236.1	253.4	27.5	5.8	258.4	210.9	185.6	72.8	16.9

有、无苔藓层覆盖各观测点的土壤含水量剖面变化如图 4，在 0—80 cm 土壤剖面内，有苔藓层覆盖观测点(Y1、Y2、Y3)和无苔藓层覆盖观测点(W1、W2、W3)土壤含水量沿剖面从表层至深层随着土壤深度的增加差别显著。

有苔藓层覆盖地点 Y1、Y2、Y3 土壤含水量空间差异沿剖面变化的总体趋势为：0—15 cm 极差略大于深层，15—80 cm 土层土壤含水量极差趋于相对较小的稳定值。如在 2010-07-10，表层 0—5 cm 处有苔藓层覆盖 3 个测点土壤含水量的极差为 4.8 mm；15—80 cm 深度内土壤含水量极差的变化范围为 2.6—5.0 mm。

2010-07-10 无苔藓覆盖地点 3 个测点表层 0—5 cm 土壤含水量的极差为 6.7 mm；15—80 cm 土壤含水量极差随土层深度的增加而增大，土壤含水量极差变化范围分别为 6.1—21.6 mm。连阴雨后有、无苔藓覆盖观测点表层 0—15 cm 土壤含水量的极差差别较小；而 15—80 cm 有苔藓覆盖地点土壤含水量极差明显小于无苔藓覆盖地点。

总体上，苔藓层覆盖地点土壤含水量的空间差异仍小于无苔藓覆盖地点。

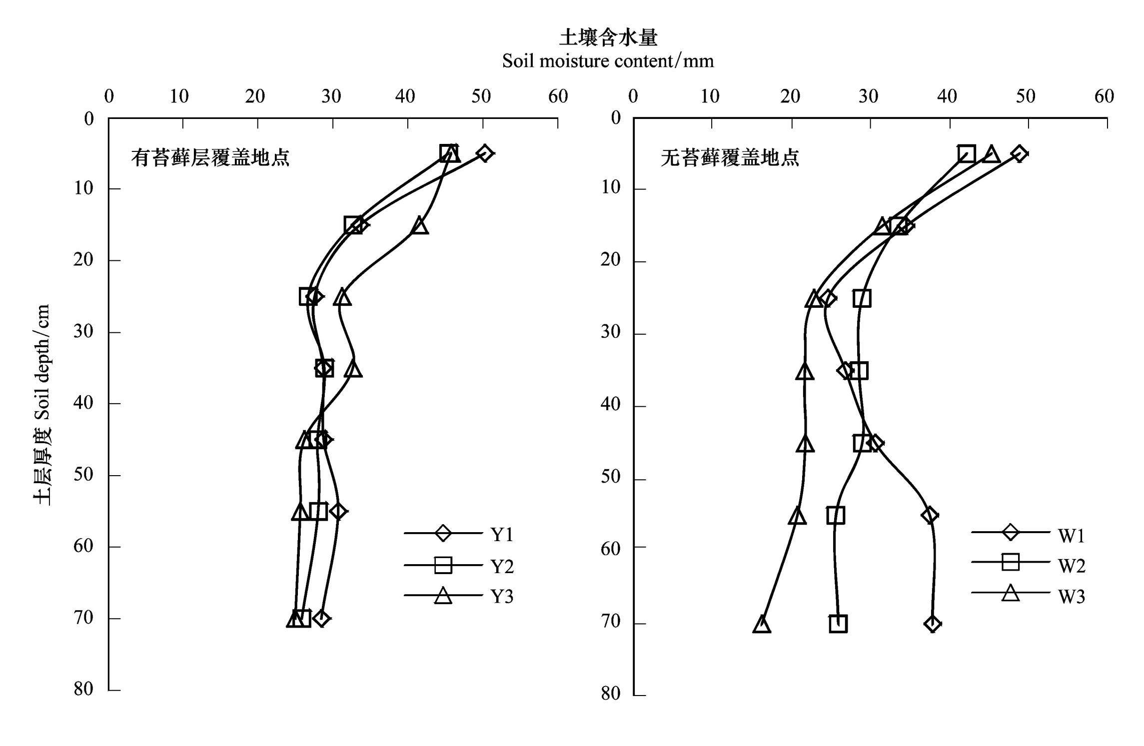


图 4 2010/7/10 连阴雨后有/无苔藓覆盖观测点土壤水分剖面变化特征

Fig.4 Soil moisture variation along soil profile at sites with/without moss layer in *Picea crassifolia* forest on July 10th, 2010

4 讨论

不同地区对苔藓层的研究均发现苔藓层具有很强的截水、持水及阻止土壤水分蒸发的功能。在加拿大魁

北克地区对泥沼苔藓的研究发现,苔藓层具有很强的保持和分配水分的能力[19]。Zdenka Hroudová 等人对捷克地区沉积盆地不同地被类型下土壤的研究发现,苔藓层的覆盖可以有效减少太阳对表层土壤的直接辐射,进而减少土壤水分蒸发[20]。我国很多学者对苔藓层的作用进行了很多定量和定性的研究,长白山暗针叶林下苔藓层最大持水量可达等同于 4.8 mm 降水[14]。祁连山地区厚度仅为 3 cm 的苔藓层持水量可达 500%[16]。针叶林下苔藓层持水量最高可达 172%,单位面积内 1.1—2.2 mm 的降水量将不会产生地表径流,体现出苔藓层的较强的水分涵养能力[16,21-22]。在长江上游贡嘎山的冷杉中,苔藓层具有明显的拦截和调蓄降水的生态水文作用[23]。地被物覆盖可以减少地表土壤水分的蒸发,有地被物覆盖地面土壤水分蒸发量为 13.8 mm,裸露地面为 56.3 mm,相差 3 倍[17]。在青海云杉林下有苔藓覆盖地点径流比无苔藓覆盖地点更为缓和均匀[24]。在祁连山青海云杉林下,有苔藓林地和无苔藓林地土壤水分差异明显,主要体现在苔藓的保水性,有苔藓林地土壤水分蒸发较小,土壤水分变化不大且稳定;无苔藓林地土壤水分蒸发大,变化明显且不稳定[16]。本研究结果表明苔藓层覆盖具有减少土壤含水量空间差异的作用,即是通过苔藓层吸持降水、涵养地表径流、减少土壤水分蒸发的作用来实现的,使得土壤含水量生长季平均值趋于较稳定的状态,与前人所得的苔藓层具有很强的保水性,能显著减少土壤水分的蒸发的结论具有一致性。

本研究发现在持续无降雨、小雨、连阴雨这 3 种天气条件影响下,苔藓层的覆盖均能减小土壤含水量的空间差异。在无降雨时,苔藓层的保水功能起主要作用,苔藓层覆盖能够减少微地形、小气候等因素对土壤水分蒸发的影响,进而使土壤含水量空间差异减少,因此表层 0—15 cm 土壤含水量空间差异明显小于无苔藓覆盖地点;而 15—80 cm 土层由于长时间得不到降水补充,且植物根系分布不均导致不同测点水分消耗程度不同,导致该深度范围土壤含水量空间差异均较大。降雨时,苔藓层持水作用起主要的生态水文功能,苔藓层的覆盖能减少降水流失和其它地点水分汇入,使得不同观测点的土壤总含水量空间差异相对小于无苔藓层覆盖地点。此时,表层 0—15 cm 土壤含水量的空间差异在不同的观测日期有、无苔藓覆盖地点无明显变化规律。主要是因为表层土壤含水量受降水量、降水时间、苔藓层自身厚度和盖度等诸多因素共同影响,不同观测日期测得的结果差异较大。而 15—80 cm 土层,有苔藓覆盖层覆盖地点土壤含水量的空间差异均小于无苔藓覆盖地点,主要是因为苔藓层的覆盖可以减少径流、增加水分渗透时间,避免无苔藓覆盖地点出现的降水流失、低洼地点积水的情况,使得不同观测点较深层次水分入渗更均匀,减少了不同观测点土壤含水量的空间差异。

5　结论

(1)有苔藓覆盖各观测点土壤含水量的空间差异小于无苔藓覆盖地点,有苔藓覆盖各观测点土壤水分空间变异系数为 1.1%—4.2%,无苔藓覆盖地点为 16.0%—18.7%。苔藓层的覆盖能显著缩小生长季平均土壤含水量的空间差异。

(2)不同的天气条件下,苔藓层覆盖对土壤水分空间差异均有减少作用。连阴雨后,苔藓层的作用更为显著。在持续无雨的情况下,无苔藓层覆盖地点 0—80 cm 土壤总含水量极差为 51.4 —63.7 mm,空间变异系数平均值为 19.8%;有苔藓覆盖地点土壤含水量空间变异系数平均值为 6.6%,仅为无苔藓覆盖地点的 1/3。小雨后,无苔藓覆盖观测点 0—80 cm 土壤总含水量极差为 7.3—23.7 mm,空间变异系数平均值为 15.2%;有苔藓覆盖地点土壤水分空间变异系数平均为 5.1%,为无苔藓覆盖地点的 1/3。连阴雨后,无苔藓覆盖观测点土壤含水量极差为 45.6—82.2 mm,空间变异系数平均为 15.4%;有苔藓覆盖地点土壤水分空间变异系数平均为 4.6%,为无苔藓覆盖地点的 1/3.3。

(3)持续无雨的情况下,苔藓层减小土壤水分空间差异的作用主要反映在土壤表层 0—15 cm,对深层的作用不显著。而小雨后和连阴雨后,苔藓层在深层土壤 15—80 cm 显著的作用显著,而表层 0—15 cm 没有明显规律。

(4)在不同的天气条件下,影响苔藓层减少土壤水分空间差异的主要水文过程不同。在持续无雨的条件下,苔藓层的保水功能起主要作用,主要表现为减少表层土壤水分蒸发;在降雨后,苔藓层的持水功能起主要

作用,主要表现为吸持降水、减少水分入渗速率及径流的形成。

参考文献(References):

[1] 张涛, 车克钧, 王辉. 祁连山青海云杉林不同海拔梯度土壤水分动态变化. 湖北农业科学, 2009, 48(5): 1107-1111.

[2] Sakai A, Inoue M, Fujita K, Narama C, Kubota J, Nakawo M, Yao T D. Variations in discharge from the Qilian mountains, northwest China, and its effect on the agricultural communities of the Heihe basin, over the last two millennia. Water History, 2012, 4(2): 177-196.

[3] 党宏忠, 赵雨森, 陈祥伟, 李进军, 达光文, 朱有文. 祁连山青海云杉林地土壤水分特征研究. 应用生态学报, 2004, 15(7): 1148-1152.

[4] 党宏忠, 周泽福, 赵雨森. 青海云杉林冠截留特征研究. 水土保持学报, 2005, 19(4): 60-64.

[5] 杨茂瑞. 亚热带杉木、马尾松人工林的林内降雨、林冠截留和树干茎流. 林业科学研究, 1992, 5(2): 158-162.

[6] 范世香, 高雁, 程银才, 白清俊. 林冠对降雨截留能力的研究. 地理科学, 2007, 27(2): 200-204.

[7] 谢春华, 关文彬, 吴建安, 程根伟, 罗辑. 贡嘎山暗针叶林生态系统林冠截留特征研究. 北京林业大学学报, 2002, 24(4): 68-71.

[8] 芦新建, 贺康宁, 王辉, 陈超, 王世雷, 王文义, 常小平, 赵丽娟, 王晓东, 安国才. 应用Gash模型对青海高寒区华北落叶松人工林林冠截留的模拟. 水土保持学报, 2014, 28(4): 44-48.

[9] 段文军, 李海防, 王金叶, 赵连生, 李光平, 王绍能. 漓江上游典型森林植被对降水径流的调节作用. 生态学报, 2015, 35(3): 663-669.

[10] 田风霞, 赵传燕, 冯兆东, 彭守璋, 彭焕华. 祁连山青海云杉林冠生态水文效应及其影响因素. 生态学报, 2012, 32(4): 1066-1076.

[11] 彭焕华, 赵传燕, 许仲林, 彭守璋, 王瑶. 祁连山青海云杉林冠层持水能力. 应用生态学报, 2011, 22(9): 2233-2239.

[12] 张学龙, 罗龙发, 敬文茂, 王顺利, 王荣新, 车宗玺. 祁连山青海云杉林截留对降水的分配效应. 山地学报, 2007, 25(6): 678-683.

[13] 田风霞. 祁连山区青海云杉林生态水文过程研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.

[14] 叶吉, 郝占庆, 于德永, 闫海冰, 封德全. 苔藓植物生态功能的研究进展. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1939-1942.

[15] 王顺利, 王金叶, 张学龙, 敬文茂. 祁连山青海云杉林苔藓枯落物分布与水文特性. 水土保持研究, 2006, 13(5): 156-159.

[16] 杨立文, 石清峰. 太行山主要植被枯枝落叶层的水文作用. 林业科学研究, 1997, 10(3): 283-288.

[17] 刘兴明, 刘贤德, 车宗玺, 张仁陟. 祁连山青海云杉林区苔藓层对流域水文的影响. 干旱区地理, 2010, 33(6): 962-967.

[18] 王金叶, 于澎涛, 王彦辉, 田大伦, 车克钧, 王顺利, 张立杰, 董晓红, 刘贤德, 张学龙, 葛双兰, 傅辉恩. 森林生态水文过程研究: 以甘肃省祁连山水源涵养林为例. 北京: 科学出版社, 2008.

[19] Price J, McCarter C, Ketcheson S. Sphagnum mosses on cutover peat: moss layer structural controls on water exchanges//EGU General Assembly Conference Abstracts. Vienna, Austria: EGU, 2013: 13372.

[20] Hroudová Z, Zákravský P. The influence of the moss layer on soil surface microclimate in an abandoned ore-washery sedimentation basin//Kovář P, ed. Natural Recovery of Human-Made Deposits in Landscape (Biotic Interactions and Ore/Ash-Slag Artificial Ecosystems). Praha: Academia, 2004: 235-247.

[21] 程金花, 张洪江, 史玉虎. 林下地被物保水保土作用研究进展. 中国水土保持科学, 2003, 1(2): 96-101.

[22] 曾信波. 苔藓层的蓄水保土功能研究. 水土保持学报, 1995, 9(4): 118-121.

[23] 陈丽华, 余新晓, 张东升, 高甲荣. 贡嘎山冷杉林区苔藓层截持降水过程研究. 北京林业大学学报, 2002, 24(4): 60-63.

[24] 车宗玺, 刘贤德, 敬文茂, 王顺利, 罗龙发, 葛双兰. 祁连山林区苔藓垂直分布特征与水文功能分析. 水土保持学报, 2006, 20(6): 71-74.